

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Hodnocení svařitelnosti ocelí pro energetická
zařízení s nadkritickými parametry

Weldability Evaluation of Steels for Power
Equipment Working with Supercritical Steam
Parameters

Student: Adam Vojtas
Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Drahomír Schwarz, CSc.

Ostrava 2012

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Zadání bakalářské práce

Student: **Adam Vojtas**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **2303R002 Strojírenská technologie**
Téma: **Hodnocení svařitelnosti ocelí pro energetická zařízení s nadkritickými parametry**
Weldability Evaluation of Steels for Power Equipments Working with Supercritical Steam Parameters

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte základní rozdělení ocelí podle použitelnosti s ohledem na teplotu a tlak.
2. Proveďte hodnocení svařitelnosti těchto ocelí.
3. Navrhněte metody svařování.
4. Zpracujte přehled přídatných materiálů použitelných pro svařování.
5. Zhodnoťte vlastnosti svarových spojů těchto ocelí.

Seznam doporučené odborné literatury:

Koukal, J., Zmydlený, T. *Svařování*. VŠB-TU Ostrava, 2005.
Turňa, M. *Špeciálne metódy zvarovania*. Alfa, Bratislava, 1989.
Kolektiv autorů. *Technologie svařování a zařízení*. ZEROSS, Ostrava, 2001.
Kolektiv autorů. *Materiály a jejich svařitelnost*. ZEROSS, Ostrava, 1999.


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Drahomír Schwarz, CSc.**

Datum zadání: 16.12.2011
Datum odevzdání: 21.05.2012



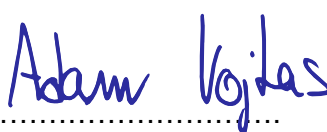

prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.
vedoucí katedry


prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 21.5.2012


.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 - školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákony o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledky její obhajoby.

V Ostravě 21.5.2012



.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Adam Vojtas

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Gen. Janouška 1, Ostrava, 702 00

Poděkování

Rád bych poděkoval doc. Ing. Drahomíru Schwarzovi CSc. za vedení mé bakalářské práce a také mé manželce a celé rodině za podporu a trpělivost.

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VOJTAS, A. *Hodnocení svařitelnosti ocelí pro energetická zařízení s nadkritickými parametry: bakalářská práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2012, 44 s.

Vedoucí práce: Schwarz, D.

Cílem této bakalářské práce je zhodnotit svařitelnost ocelí používaných v energetice, s důrazem na moderní materiály navrhované v současné energetice (vysokoteplotní a vysokotlaké).

Dalším úkolem této práce je poskytnout přehled o způsobech jejich svařování, navrhnout přídatné materiály a zhodnotit vlastnosti výsledných svarů.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

VOJTAS, A. *Weldability evaluation of Steels for Power Equipment Working with Supercritical Steam parameters: Bachelor Thesis*. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2012, 44 p.

Thesis head: Schwarz, D.

The aim of this Bachelor thesis is to evaluate the weldability of steels used in energetics with emphasis on the modern materials designed in current energetics, in particular high temperatures and pressures.

The other tasks of this thesis are to give an overview of their welding methods, propose additional materials and assess features of final welds.

Obsah

ÚVOD	10
1. Rozdělení ocelí podle použitelnosti	11
1.1. Uhlíkové oceli.....	11
1.1.1. Ocel P235GH.....	11
1.1.2. Ocel P355GH.....	11
1.1.3. Hodnocení svažitelnosti uhlíkových ocelí.....	12
1.2. Nízkolegované oceli	12
1.2.1. Ocel 16Mo3.....	12
1.2.2. Ocel 13CrMo4-5.....	12
1.2.3. Ocel 10CrMo9-10.....	13
1.2.4. Hodnocení svažitelnosti nízkolegovaných ocelí	13
1.3. Feritické a martenzitické modifikované chromové oceli	14
1.3.1. Ocel P23 (7CrWVMoNb9-6).....	14
1.3.2. Ocel P24 (7CrMoVTiB10-10)	14
1.3.3. Ocel P91 (X10CrMoVNB9-1).....	15
1.3.4. Ocel P92 (X10CrWMoVNB9-2).....	15
1.3.5. Hodnocení svažitelnosti feritických a martenzitických modifikovaných chromových ocelí	16
1.4. Austenitické oceli	16
1.4.1. Ocel X10CrNiCuNb 18 9 3	16
1.4.2. Hodnocení svažitelnosti austenitických ocelí	16
1.5. Martenzitické chromové oceli	17
1.5.1. Ocel X12CrCoWVNB11-2-2 (VM12-SHC)	17
1.5.2. Hodnocení svař. martenziticko chromových ocelí.....	17

1.6.	Niklové slitiny	18
1.6.1.	NiCr28FeSiCe (Nicrofer 45 TM)	18
1.6.2.	NiCr25FeAlY (Nicrofer 6025 HT)	18
1.6.3.	Hodnocení svařitelnosti niklových slitin	19
2.	Návrh metod svařování a přídavných materiálů	20
2.1.	Uhlíkové oceli	20
2.1.1.	Přídavné materiály pro uhlíkové ocele	22
2.2.	Nízkolegované oceli	23
2.2.1.	Přídavné materiály pro nízkolegované ocele	24
2.3.	Feritické a martenzitické modifikované chromové oceli	25
2.3.1.	Přídavné materiály pro feritické a martenzitické modifikované chromové ocele	25
2.4.	Austenitické oceli	27
2.4.1.	Přídavné materiály pro austenitickou ocel	28
2.5.	Martenzitické chromové oceli	29
2.5.1.	Přídavné materiály pro martenzitickou chromovou ocel	30
2.6.	Niklové slitiny	30
2.6.1.	Přídavné materiály pro niklové slitiny	31
3.	Zhodnocení vlastností svarových spojů	32
3.1.	Uhlíkové oceli	33
3.2.	Nízkolegované oceli	34
3.3.	Feritické a martenzitické modifikované chromové oceli	35
3.4.	Austenitické oceli	36
3.5.	Martenzitické chromové oceli	36
3.6.	Niklové slitiny	37
4.	Závěr	40
	Seznam použité literatury	41
	Seznam použitých obrázků	44

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ

Značka	Veličina	Jednotka
ČSN	Česká státní norma	[-]
EN	Evropská norma	[-]
ISO	Mezinárodní norma	[-]
C_E	Uhlíkový ekvivalent	[%]
Cr_{eq}	Chromový ekvivalent	[%]
Ni_{eq}	Niklový ekvivalent	[%]
R_m	Mez pevnosti v tahu	MPa
111	Ruční obloukové svařování	[1]
114	Obloukové svařování plněnou elektrodou bez ochranného plynu	[1]
121	Svařování pod tavidlem drátovou nebo plněnou elektrodou	[1]
131	Svařování tavící se elektrodou v atmosféře inertního plynu (MIG)	[1]
135	Svařování tavící se elektrodou v atmosféře aktivního plynu (MAG)	[1]
141	Svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu (WIG)	[1]
15	Svařování plasmou	[1]
51	Elektronové svařování	[1]
52	Laserové svařování	[1]

ÚVOD

V moderní době je stále větší a větší poptávka po elektrické energii. Proto výrobci energetických zařízení, projekční firmy a provozovatelé hledají stále nové a nové možnosti vylepšení funkce a designu energetických zařízení. Toto s sebou nese i požadavky na modernější materiály, které vydrží vyšší teploty a tlaky a také materiálovou spolehlivost a stálost. V konečném důsledku toto zvětší účinnost tepelného zařízení, případně také výkon, cenu, kvalitu a životnost.

Toto samozřejmě tlačí výrobce hutního materiálu inovovat a vymýšlet materiály, které vyhoví potřebám a budou mít dobré vlastnosti pro mechanické zpracování. Nadkritické parametry můžeme považovat teploty nad 600 °C a tlaky 25 MPa a vyšší. S tímto souvisí i jejich svařitelnost.

Ve snaze o co nejefektivnější návrh provedení a výrobu zařízení pro energetiku, je někdy efektivnější použít ocel s lepší jakostí, které vyhoví stejným parametrům, ale s mnohem menší tloušťkou. Toto v důsledku znamená veliké úspory materiálů a nákladů na výrobu, montáž, provedení uložení potrubí a ocelové konstrukce. [1]

První části této bakalářské práce přináší přehled používaných materiálů v energetice s důrazem na nadkritické parametry, jejich charakteristiku a použití. Pro celkový pohled zde uvádím i materiály běžně používané v energetice. Druhá část je zaměřena na návrh metod svařování, zpracován přehled přídatných materiálů pro navrhnuté metody svařování a nakonec je provedeno hodnocení vlastností svarových spojů.

1. Rozdělení ocelí podle použitelnosti

1.1. Uhlíkové oceli

1.1.1. Ocel P235GH

Jedna z nejběžnějších a nepoužívanějších ocelí s feriticko-perlitickou strukturou v energetice. Obsah uhlíku a manganu jsou hlavní faktory, které ovlivňují pevnostní vlastnosti. Používá se pro tepelné výměníky, výhřevné plochy, trubky, fitinky a tlakové nádoby do teploty 350 °C. [2]

Tab. 1. Chemické složení oceli P235GH (hm.%) [3]

C max.	Si max.	Mn	P max.	S max.	Cu max.	Ni max.	Cr max.	Mo max.	V max.	Nb max.	Al min.	Cr+Cu +Mo+ Ni
0,16	0,35	0,60 - 1,20	0,025	0,015	0,30	0,30	0,30	0,08	0,02	0,02	0,02	0,70

1.1.2. Ocel P355GH

Tato ocel má podobné vlastnosti a použití jako P235GH. Má ale vyšší mez pevnosti v tahu R_m jako výsledek přidání niobu z důvodu zjemnění zrna. Odolnost proti tečení se mírně zvýšila oproti předcházející oceli. Použití v aplikacích do 400 °C. [2]

Tab. 2. Chemické složení oceli P355GH (hm.%) [3]

C	Si max	Mn	P max.	S max.	Cu max.	Ni max.	Cr max.	Mo max.	V max.	Nb max.	Al min.	Cr+Cu +Mo+ Ni
0,10 - 0,22	0,60	1,10 - 1,70	0,025	0,015	0,30	0,30	0,30	0,08	0,03	0,02	0,02	0,70

1.1.3. Hodnocení svařitelnosti uhlíkových ocelí

Svařitelnost materiálu obecně se dá hodnotit více ukazateli, z nichž jeden je pomocí uhlíkového ekvivalentu C_E . Používá se několik způsobů (empirických vztahů) jeho výpočtu. Uhlíkový ekvivalent je závislý na chemickém složení oceli, v některých výpočtech se zohledňuje i tloušťka materiálu. Svařitelnost má materiál horší se vzrůstající hodnotou C_E .

Oceli v této skupině jsou dobře svařitelné a cenově dostupné. Jejich svařitelnost závisí převážně na jejich chemickém složení, hlavně na obsahu uhlíku. Méně už na obsazích Mn, Si, P a S. Používají se v normalizovaném, případně normalizované a popouštěném stavu. Jako problém se může jevit vznik pórů a trhlin u svařování neuklidněných ocelí. [4]

1.2. Nízkolegované oceli

1.2.1. Ocel 16Mo3

Nízkolegovaná Mo-ocel navržená pro práci ve zvýšené teplotě v energetice. Má feriticko-bainitickou strukturu a je použitelná až do teploty 460 °C.

Tab. 3. Chemické složení oceli 16Mo3 (hm.%) [3]

C	Si max.	Mn	P max.	S max.	Cu max.	Ni max.	Cr max.	Mo
0,12 – 0,20	0,35	0,40 – 0,90	0,025	0,010	0,30	0,30	0,30	0,25 – 0,35

1.2.2. Ocel 13CrMo4-5

CrMo-ocel se s úspěchem používá v energetice nad teploty 500 °C. Je to materiál pro konvenční kotle s dobrou odolností proti tečení. Ocel má dobré antikorozní vlastnosti vyšší než normální odolnost proti teplotě.

Tab. 4. Chemické složení oceli 13CrMo4-5 (hm.%) [3]

C	Si max.	Mn	P max.	S max.	Cu max.	Cr max.	Mo
0,08		0,40				0,70	0,40
–	0,35	–	0,025	0,010	0,30	–	–
0,18		1,00				1,15	0,60

1.2.3. Ocel 10CrMo9-10

CrMo-ocel s vyšším obsahem chrómu (až 2,5 %) než předcházející ocel. Teploty použití se pohybují taky nad teplotou 500 °C.

Tab. 5. Chemické složení oceli 10CrMo9-10 (hm.%) [3]

C	Si max.	Mn	P max.	S max.	Cu max.	Cr	Mo max.
0,08		0,40				2,00	0,90
–	0,50	–	0,020	0,010	0,30	–	–
0,14		0,80				2,50	1,10

1.2.4. Hodnocení svařitelnosti nízkolegovaných ocelí

Tyto oceli jsou relativně dobře svařitelné. Mají vyšší žárupevnost, jakož i mez kluzu a mez pevnosti než uhlíkové oceli. Hlavní prvky, které ovlivňují vlastnosti těchto ocelí, jsou C, Cr, Mo a V. Oceli se používají ve stavu normalizovaném a popouštěném. Při svařování nízkolegovaných ocelí se musí dodržet určité podmínky, např. velká rychlost ochlazování může vyvolat vznik křehkých vrstev, nebo nevhodná precipitace tvrdých částí v určitých oblastech svaru.

Je proto důležité dodržovat svařovací postupy. Jde hlavně o tepelný příkon, předehřev a dohřev, následné tepelné popouštění svaru nebo celkové tepelné zpracování. Dodržení je důležité především u větších tloušťek základního materiálu, a to teploty předehřevu po celou dobu svařování. [4]

1.3. Feritické a martenzitické modifikované chromové oceli

1.3.1. Ocel P23 (7CrWVMoNb9-6)

Žáropevná mikrolegovaná ocel s dostatečnou odolností proti tečení. Původně vyvinuta jako alternativa k martenzitickým ocelím s vyšším obsahem chromu. Používá se jako materiál pro membránové stěny kotlů, jelikož má dostatečnou pevnost a jako materiál výhřevných ploch přehříváků, trubek, fitinků a tlakových nádob. Teploty použití se pohybují kolem 550 °C.

Tab. 6. Chemické složení oceli P23 (hm.%) [5]

C	Si max.	Mn	P max.	S max.	Cr	Mo	W	Nb	V	B
0,04	0,50	0,10	0,030	0,01	1,90	0,05	1,45	0,20	0,20	0,0005
–		–			–	–	–	–	–	–
0,10		0,60			2,60	0,30	1,75	0,08	0,30	0,0060

1.3.2. Ocel P24 (7CrMoVTiB10-10)

Tato ocel patří do skupiny nízkolegovaných feriticko-bainitických ocelí. Podobné vlastnosti a použití jako ocel P23, jenom místo legujícího prvku niobu je použit titan. Použití na membránové stěny kotlů tlakové nádoby, výparníky a přehříváky. Je to také varianta k martenzitickým ocelím s vyšším obsahem chromu (např. P91). Dá se použít do teploty 550 °C.

Tab. 7. Chemické složení oceli P24 (hm.%) [5]

C	Si	Mn	Ti	Cr	Mo	V	Al max.	B
0,05	0,15	0,30	0,05	2,20	0,90	0,20	0,020	0,0015
–	–	–	–	–	–	–		–
0,10	0,45	0,70	0,10	2,60	1,10	0,30		0,007

1.3.3. Ocel P91 (X10CrMoVNb9-1)

Jde o martenzitickou ocel. Použití oceli je možné do teplot kolem 600 °C a tlaků do 30MPa a to díky vytvrzení tuhého roztoku atomy molybdenu a vyloučením jemných precipitátů vanadu a niobu. Také přísada dusíku má velký vliv na vyšší žárovevnosti. Ocel má vysokou pevnost proti tečení. Je velmi používána, jelikož je levnější než austenitické CrNi-oceli. Používá se na často jako materiál hlavní parní větve, pro přehříváky, trubky, fitinky a tlakové nádoby.

Tab. 8. Chemické složení oceli P91 (hm.%) [3]

C	Si max.	Mn	P max.	S max.	Cu max.	Ni max.	Cr	Mo	V	Al max.	Nb
0,08 – 0,12	0,50	0,30 – 0,60	0,020	0,005	0,30	0,30	8,00 – 9,50	0,85 – 1,05	0,18 – 0,25	0,040	0,06 – 0,10

1.3.4. Ocel P92 (X10CrWMoVNb9-2)

Jedná se taky o martenzitickou ocel jako předcházející P91, ale oproti ní je legována wolframem a bórem pro zvýšení odolnosti proti tečení. Používá se pro teploty kolem 600 °C a tlaky do 30MPa.

Tab. 9. Chemické složení oceli P92 (hm.%) [6]

C	Si max.	Mn	P max.	S max.	Ni max.	Cr	Mo	V	Al min.	Nb	B	W
0,07 – 0,13	0,50	0,30 – 0,60	0,020	0,01	0,40	8,50 – 9,50	0,30 – 0,60	0,15 – 0,25	0,040	0,04 – 0,09	0,001 – 0,006	1,50 – 2,00

1.3.5. Hodnocení svařitelnosti feritických a martenzitických modifikovaných chromových ocelí

Svařování těchto ocelí je složitější z důvodu většího počtu legur. Proto se musí přísně dodržovat technologické postupy. Mají horší tepelnou vodivost a jsou náchylnější ke vzniku tepelných pnutí. Důležité parametry k dodržení jsou teplota přehřevu a dohřevu. Dále se sledují i další vlivy na kvalitu svaru což jsou geometrie svaru, sušení přídavných materiálů, rychlost svařování a sušení přídavných materiálů. Po svařování je nezbytné použít tepelné zpracování, např. popouštění resp. normalizační žíhání a následné popouštění. [4]

1.4. Austenitické oceli

1.4.1. Ocel X10CrNiCuNb 18 9 3

Tato ocel se řadí mezi austenitické ocele. Je to slitina na bázi železa s obsahem mědi a nejvyšší odolnosti proti tečení za vysokých teplot. Je obtížně zpracovatelná, nesrovnatelně dražší než CrMn-oceli z důvodu použitých legur. Tento materiál je použitelný do teplot 650 °C pro trubky přehříváků a přehříváků.

Tab. 10. Chemické složení oceli X10CrNiCuNb 18 9 3 (hm.%) [7]

C	Si max.	Mn max.	P max.	S max.	Ni	Cr	Nb	Cu	Al	B
0,07 – 0,13	0,30	1,00	0,040	0,010	7,50 – 10,5	17,00 – 19,00	0,30 – 0,60	2,50 – 3,50	0,003 – 0,030	0,001 – 0,010

1.4.2. Hodnocení svařitelnosti austenitických ocelí

U těchto ocelí, které se vyznačují vysokou odolností proti tečení, je obtížná zpracovatelnost do polotovarů. Jsou poměrně drahé z důvodu použitých legur. Z důvodu velké tepelné roztažnosti a malé tepelné vodivosti vznikají při svařování velká tepelná pnutí, tzn. vznik trhlin za horka. Musí se proto kontrolovat maximální tepelný příkon. Naopak nejsou náchylné na vznik studených trhlin, protože se v nich vodík dobře rozpouští. Není proto potřeba aplikovat přehřev. [4]

Ocel má na sobě tenkou vrstvu oxidu chromu. Tato vrstva reaguje s atmosférou, jestliže je porušena. Když není materiál odpovídajícím způsobem chráněn před atmosférou během svařování, tato tenká vrstva se poruší a tímto se snižuje korozní odolnost oceli. [8]

1.5. Martenzitické chromové oceli

1.5.1. Ocel X12CrCoWVNb11-2-2 (VM12-SHC)

Jedná se o martenzitickou chromovou ocel pro vysoké teploty až 650 °C s použitím pro trubky do tloušťky 10mm. Má vyšší obsah chromu v porovnání s ocelí P92 a je legována kobaltem. Tímto se dosahuje vysoká odolnost proti oxidaci a lepší žáruvzdornost. [9]

Tab. 11. Chemické složení oceli X12CrCoWVNb11-2-2 (hm.%) [10]

C	Mn	Si.	P max.	S max.	Al max.	Cu max.	Cr	Ni	Mo	W
0,10 – 0,14	0,15 – 0,45	0,40 – 0,60	0,002	0,015	0,25	0,25	11,00 – 12,00	0,10 – 0,40	0,20 – 0,40	1,30 – 1,70
V	B	Nb	Co							
0,20 – 0,30	0,003 – 0,006	0,03 – 0,06	1,40 – 1,80							

1.5.2. Hodnocení svař. martenziticko chromových ocelí

Mají vyšší obsah chromu než feritické chromové oceli. Při svařování se musí použít přehřev, kontrolovat teplotu interpass a na závěr použít dohřev. Toto vše má zamezit vzniku studených trhlin. Po svařování je také nutné aplikovat tepelné zpracování, obvykle žihání na odstranění vnitřního pnutí a popouštění na odstranění tvrdosti a pevnosti martenzitu. [4]

1.6. Niklové slitiny

1.6.1. NiCr28FeSiCe (Nicrofer 45 TM)

Tento materiál je vysoce chromová, austenitická niklová slitina pro vysoké teploty s extrémně korozivními médii, například ve spalovnách odpadů a chemickém průmyslu. Dobrá odolnost proti tečení. Vyrábějí se trubky, fitinky a další příslušenství. Slitina se dá použít při teplotách do 950 °C. [11]

Tab. 12. Chemické složení slitiny NiCr28FeSiCe (hm.%) [11]

C	Mn max.	Si	P max.	S max.	Cu max.	Ni min.	Cr	Al max.	Fe	Ce
0,05 – 0,12	1,0	2,5 – 3,0	0,015	0,010	0,30	45,0	26,0 – 29,0	0,20	21,0 – 25,0	0,03 – 0,08

1.6.2. NiCr25FeAlY (Nicrofer 6025 HT)

Tato slitina s vyšším obsahem uhlíku, niklu, chromu a železa s přidávkou dalších mikrolegur najde své uplatnění v energetice jako např. materiál pro výhřevné trubky. Odolává oxidaci při vysokých teplotách a má odolnost i proti dalším chemickým prvkům. Dá se použít i na tlakové nádoby pro teploty kolem 1000 °C. [12]

Tab. 13. Chemické složení slitiny NiCr25FeAlY (hm.%) [12]

C	Mn max.	Si max.	P max.	S max.	Cu max.	Ni min.	Cr	Ti	Al	Y	Zr
0,15 – 0,25	0,50	0,50	0,020	0,010	0,10	41,0	24,0 – 26,0	0,10 – 0,20	1,80 – 2,40	0,05 – 0,12	0,01 – 0,10

1.6.3. Hodnocení svařitelnosti niklových slitin

Niklové slitiny nabízejí velkou výhodu použití ve vysokých teplotách a v agresivních prostředích. K dosažení určené životnosti a svařitelnosti se musí brát na zřetel specifické podmínky pro návrh technologie svařování. K prevenci praskání a trhlin ve swarech je doporučeno použít eliptickou nebo zaoblenou svarovou lázeň. Toto závisí na způsobu svařování a také na rychlosti posunu. Při pomalejší posunu byly praskliny výraznější. Dalšími faktory, které ovlivňují praskání, jsou technika svařování a vysoký přísun tepla do svaru. Toto závisí hlavně na metodě svařování. [13]

Pro svařování se nepoužívá přehřev, jelikož se tím snižují vlastnosti slitiny. Je vhodné limitovat měrný tepelný příkon svařování. Pro tenčí plechy se doporučuje odvádět teplo do podložky. U svařování niklových slitin je důležité dbát na čistotu. Znečištění svaru značně snižuje kvalitu a jeho mechanické parametry hlavně při vyšších teplotách. Uhlík má nepříznivý vliv na svařitelnost a na vznik studených trhlin. Proto by se měl pohybovat do max. 0,2 %. Při svařování v ochranných plynech musí být zabezpečena velká čistota argonu. Je důležité zabezpečit přívod argonu ke kořenu svaru, případně i na celý povrch svaru po celou dobu zahřátí k ochraně proti oxidaci. Tepelné zpracování po svařování niklových slitin se obvykle neprovádí. Ve speciálních případech, např. po opravách svarů se dá aplikovat stabilizační žíhání na odstranění pnutí. [4]

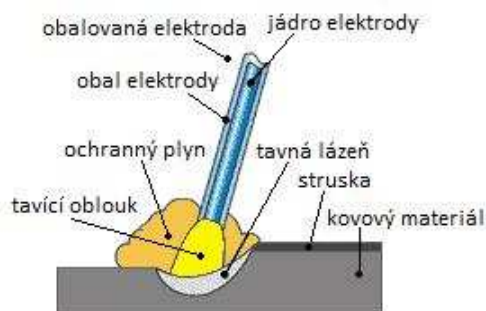
2. Návrh metod svařování a přídatných materiálů

Metody svařování pro jednotlivé ocele se odvíjejí od toho, jaký výrobek potřebujeme svařit, kde bude tento svar proveden a v jakých podmínkách je třeba svar udělat. V moderní energetice je snaha a to, aby co největší procento svarů bylo provedeno přímo ve výrobě. Proto se provádí předmontáž na díly o určité velikosti, aby byly jednoduše přepravitelné. Samotná příprava svarových hran, technologie a provedení svarů nese u materiálů pro nadkritické parametry velké nároky na přesnost provedení předehřevu, dohřevu, tepelného zpracování, dodržení čistoty a provedení svarů jakož i na přípravky pro smontování před svařením. O toho se odvíjí i nižší cena v porovnání s provedením svarů přímo v místě montáže energetického zařízení.

S ohledem na místo svařování (dílna výrobce, jednoduchá dílna na stavbě nebo např. montážní svaření trubek na venkovním prostranství) můžeme uvažovat o vhodné metodě svařování. Každý výrobce preferuje určité metody, např. dle zkušeností, dle vlastních svařovacích strojů, na které má vyškolený personál. V dnešním globálním světě se na projektech podílejí společnosti ze všech koutů zeměkoule.

2.1. Uhlíkové oceli

Tyto oceli se svařují všemi známými svařovacími technologiemi. Základní metodou pro svařování těchto ocelí je ruční obloukové svařování obalenou elektrodou (111). Tuto metodu lze použít prakticky pro všechny materiály a všechny polohy. Svařuje se buď stejnosměrným (usměrňovače nebo agregáty) nebo střídavým (transformátor) proudem. Pro svařování potrubí a částí kotlů se používá poloha PG. Zdroje pro svařování mají k tomuto uzpůsobené zapálení a držení oblouku vysokým napětím naprázdno. Zamezuje se tím vzniku zkratů mezi elektrodou a základní materiálem. [4] [14]



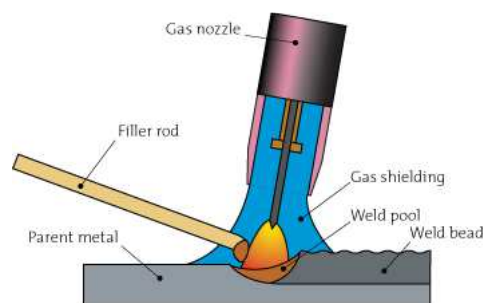
Obr. 1. Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou 111

Další metodu, kterou můžeme použít ve svařování uhlíkových ocelí je metoda MIG/MAG (131/135). Velice univerzální metoda, rozšířená. Používají se většinou svařovací inventory s podavačem drátu ve společné skříní se zdrojem. [4] [14]



Obr. 2. Svařování metodou 131/135 (MIG/MAG)

Poslední metodu pro svařování uhlíkových ocelí volím WIG (141). U svařování trubek se dá s úspěchem použít strojního zařízení pro orbitální svařování. Svařovací hlava obíhá po kružnici a na ní osciluje hořák. [4] [14]



Obr. 3. Svařování metodou 141 (WIG)

2.1.1. Přídavné materiály pro uhlíkové ocele

Přídavné materiály pro uhlíkové ocele se navrhují hlavně dle obsahu uhlíku v ocelích. Ten by měl korespondovat s obsahem uhlíku v přídavném materiálu. Taky je důležité dodržet velikost meze pevnosti R_m . Pro tyto základní materiály má už každý výrobce připraveny určité přídavné materiály.

Tab. 14. Přehled přídavných materiálů pro uhlíkové ocele [15], [16], [17]

Materiál	Metoda svařování	Výrobce přídavného materiálu	Navržený přídavný materiál
P235GH / P355GH	111	ESAB	E-B 121
		Böhler	FOX EV PIPE
		Hyundai	S-4303.V
P235GH / P355GH	135	ESAB	OK AUTROD 12.58
		Böhler	EMK 6
		Hyundai	SM-70S
P235GH / P355GH	141	ESAB	OK TIGROD 12.60
		Böhler	Union I 52
		Hyundai	ST-50.3

2.2. Nízkolegované oceli

Pro svařování tlakových nádob, přivaření půlkulových dnů na tělo nádoby, případně ke svaření potrubí se dá použít metoda svařování elektrickým obloukem pod tavidlem (121). Mezi výhody této metody patří velká produktivita a kvalita svarů. Svařuje se holou elektrodou neomezené délky, která musí být v místě svaru krytá ochrannou vrstvou tavidla. Doporučené polohy pro svařování jsou PA nebo PB. Je vyžadována přesnější úprava svarové hrany a čistota. Podle způsobu pohybu celého zařízení se rozděluje na poloautomatické nebo automatické. [14]



Obr. 4. Svařování elektrickým obloukem pod tavidlem 121

Nízkolegované materiály můžeme dále svařovat metodou WIG (141) a samozřejmě taky ručním obloukovým svařováním (111).

2.2.1. Přídavné materiály pro nízkolegované ocele

Při volbě přídavných materiálů pro tyto ocele, je nutné dodržet chemické složení nejenom dle obsahu uhlíku taky dle obsahu chromu a molybdenu a zohlednit úroveň meze pevnosti v tahu R_m .

Tab. 15. Přehled přídavných materiálů pro nízkolegované ocele [15], [16], [17]

Materiál	Metoda svařování	Výrobce přídavného materiálu	Navržený přídavný materiál
16Mo3	111	ESAB	OK 74.46
		Böhler	FOX DMO Kb
		Hyundai	S-7010.A1
13CrMo4-5	141	ESAB	OK TIGROD 13.12
		Böhler	Union I CrMo
		Hyundai	ST-1N
10CrMo9-10	121	ESAB	OK AUTROD 13.20SC + OK FLUX 10.62
		Böhler	Union S 1 CrMo 2 + UV 420 TTR
		Hyundai	S-777MXT x B-3

2.3. Feritické a martenzitické modifikované chromové oceli

Je nutné svařovat tyto materiály s limitovaným tepelným příkonem do svaru a zásadně s předehřevem. Doporučené metody svařování pro tyto materiály jsou laser (52), ruční obloukové svařování (111), MIG (131) a WIG (141). Je nezbytné dodržet čistotu svarových ploch a přídavného materiálu. [4]

2.3.1. Přídavné materiály pro feritické a martenzitické modifikované chromové ocele

Přídavné materiály pro svařování těchto ocelí volíme stejného chemického složení jako základní materiál s odpovídající mezí pevnosti v tahu R_m . Případně je možno použít přídavné materiály dolegované Ni. Svarový kov má potom malou náchylnost ke vzniku trhlin za studena. Také se dají použít jako přídavné materiály niklové slitin. [4]

Tab. 16. Přehled přídavných materiálů pro feritické a martenzitické modifikované chromové ocele [15], [16], [17], [18]

Materiál	Metoda svařování	Výrobce přídavného materiálu	Navržený přídavný materiál
P23	111	ESAB	OK 76.26
		Böhler	Thermanit P23
		Hyundai	S-9016.B3
P24	141	ESAB	OK TIGROD 13.17
		Böhler	Union I P24
		Oerlikon	CROMO E225
P91	111	ESAB	OK 76.98
		Böhler	Thermanit Chromo 9V
		Hyundai	S-600B.B
P92	141	ESAB	OK TIGROD 13.38
		Böhler	Thermanit MTS 616
		Oerlikon	CARBOROD KV7M

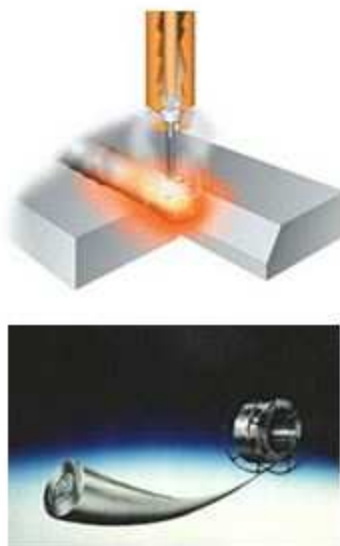
2.4. Austenitické oceli

Zvolená technologie svařování ovlivňuje výslednou strukturu svaru. Při použití svařovací technologie, kde není třeba dodávat přídavný materiál (plasma, elektronový paprsek, laser) bude svarový kov obsahovat větší podíl feritu, tímto bude náchylnější ke korozi. [4]

Tento materiál je doporučován svařovat metodami 111, 141 a také metodou 114 - obloukové svařování plněnou elektrodou bez ochranného plynu. [19]

Velký součinitel tepelné roztažnosti v sobě skrývá problémy velkým vnitřním pnutím a s nežádoucími deformacemi základních materiálů. Oceli mají špatnou tepelnou vodivost, proto je požadován nižší svařovací proud (typicky o 25% menší než u uhlíkových ocelí). [8]

Tyto materiály mají dobrou odolnost proti korozi, ale ke korozi může dojít v určitých prostředích. Správný zvolený druh přídavného materiálu a technika svařování jsou důležité, protože svarový kov může korodovat více než základní materiál. [8]



Obr. 5. Obloukové svařování plněnou elektrodou bez ochr. plynu 114

2.4.1. Přídavné materiály pro austenitickou ocel

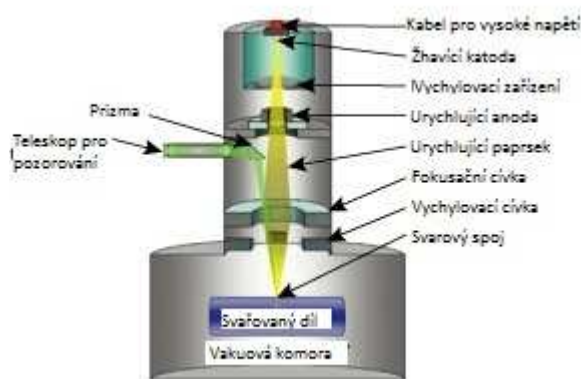
Pro austenitické ocele je doporučeno volit přídavné materiály se stejným chemickým složením jako základní materiál, případně přídavné materiály s vysokým obsahem Ni. [4]

Tab. 17. Přehled přídavných materiálů pro austenitickou ocel [15], [16], [17]

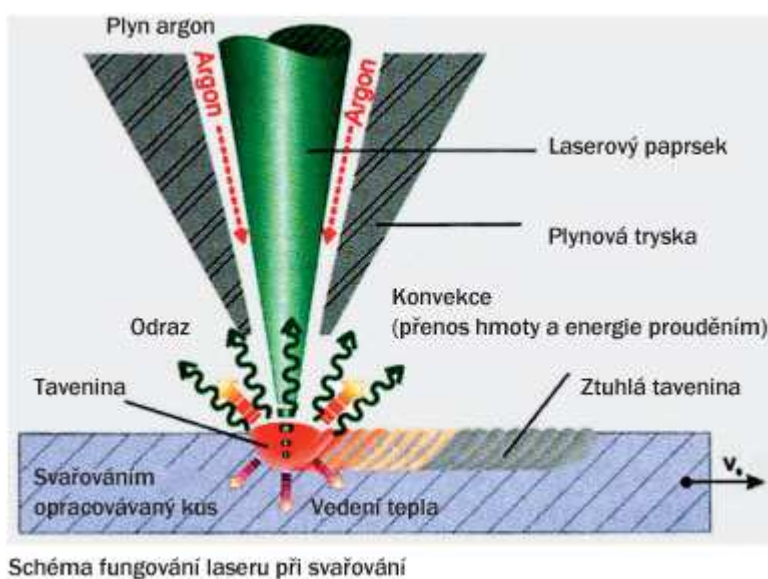
Materiál	Metoda svařování	Výrobce přídavného materiálu	Navržený přídavný materiál
X10CrNiCuNb 18 9 3	111	ESAB	OK 63.30
		Böhler	Thermanit ATS 4
		Hyundai	S-308LT.16
X10CrNiCuNb 18 9 3	114	ESAB	SHIELD-BRIGHT 347
		Böhler	Thermanit ASi
		Hyundai	SC-423S
X10CrNiCuNb 18 9 3	141	ESAB	OK TIGROD 308H
		Böhler	Thermanit ATS 4
		Hyundai	ST-347

2.5. Martenzitické chromové oceli

Je možné použít běžné technologie svařování, jako je například metoda 111. Tyto oceli lze svařovat elektronovým paprskem (metoda 51) nebo laserem (metoda 52). [4] Elektronové svařování bylo dříve využíváno pro vesmírnou, leteckou nebo jadernou techniku. V dnešní době se v energetice používá na svařování potrubí, turbín nebo kontrolních sond. Tyto metody svařování se uplatní hlavně při svařování heterogenních materiálů a těžko svařitelných kovů. U těchto metod není třeba dodávat přídavný materiál. Mezi výhody se dají počítat úzký svar s minimální tepelně ovlivněnou oblastí, minimální deformace svařovaných součástí a minimální stupeň promísení. [20]



Obr. 6. Svařování elektronovým paprskem ve vakuu 511



Obr. 7. Svařování laserem 52

2.5.1. Přídavné materiály pro martenzitickou chromovou ocel

Přídavné materiály volíme co nejbližší chemickému složení základního materiálu, případně můžeme použít materiály pro svařování austenitických ocelí. U svařování velmi tvrdých dílů lze použít slitiny Ni-Cr nebo Ni-Cr-Fe. [4]

Tab. 18. Přehled přídavných materiálů pro martenzitickou chromovou ocel [16], [18]

Materiál	Metoda svařování	Výrobce přídavného materiálu	Navržený přídavný materiál
X12CrCoWVNb11-2-2	111	Böhler	Thermanit MTS 5CoT
		Oerlikon	BASINOX 410 S
X12CrCoWVNb11-2-2	141	Böhler	Thermanit MTS 5CoT
		Oerlikon	INERTROD 420

2.6. Niklové slitiny

Jelikož má slitina NiCr28FeSiCe omezenou svařitelnost, jsou ověřené jenom dvě metody svařování a to metoda 111 a metoda 141. Použití jiných metod musí být odsouhlaseno svářecími zkouškami u výrobce základního materiálu. [11]

Slitina NiCr25FeAlY může být svařována metodami 111, 141 a plasmou (metoda 15). U svařování plasmou se dá použít stejný přídavný materiál jako u metody 141. [12]

2.6.1. Přídavné materiály pro niklové slitiny

Tab. 19. Přehled přídavných materiálů pro niklové slitiny [21], [12], [11], [22], [23]

Materiál	Metoda svařování	Výrobce přídavného materiálu	Navržený přídavný materiál
NiCr28FeSiCe	111	Special Metals	Inconel Welding Electrode 117
		Materiál elektrody doporučený výrobcem	1.4563
NiCr28FeSiCe	141	ThyssenKrupp	Nicrofer S 3028
NiCr25FeAlY	111	ThyssenKrupp	UNS W86025
		UTP	6225 Al
NiCr25FeAlY	141 / 15	ThyssenKrupp	UNS N06025
		UTP	A 6225 Al

3. Zhodnocení vlastností svarových spojů

Pro ověření vlastností svarových spojů se dají po svaření a následném tepelné zpracování použít tyto základní zkoušky:

- nedestruktivní
 - vizuální kontrola
 - kapilární zkouška
 - radiografická zkouška
 - ultrazvuková zkouška
- destruktivní
 - zkouška tahem
 - zkouška vrubové houževnatosti
 - zkoušky tvrdosti
 - zkouška v ohybu
 - zkouška únavové pevnosti
 - speciální zkoušky
- metalografické
 - makrostruktura
 - mikrostruktura

U každé zkoušky se vyhodnotí, jestli vzorek odebraný ze svarového spoje vyhoví určitému předepsanému parametru, stupni či odlišnosti od hodnot základního materiálu podle ČSN 15614 a výrobní normy.

Pro ověření vlastností svarového spoje se hlavně u materiálů pro energetiku provádějí mechanické zkoušky za zvýšených teplot. Při vzrůstající teplotě dochází k poklesu hodnot meze kluzu a pevnosti. Dále se používají zkoušky tečení (creep). U zkoušek tečení se pomocí několika extrapoláčnických postupů získávají hodnoty meze pevnosti při tečení, což je důležitá informace pro konstruktéra k návrhu zařízení při práci za zvýšených teplot. [4]

U metalografických zkoušek se ověřuje struktura materiálu svarového spoje. Od pouhého pozorování okem do zvětšení cca 30x (makrostruktura), až po zvětšení 2000x (mikrostruktura). Kontrolují se například příčiny porušení svaru, různé nečistoty v materiálu, rozložení strukturních fází a složek, velikosti zrna, vměstky, apod. [4]

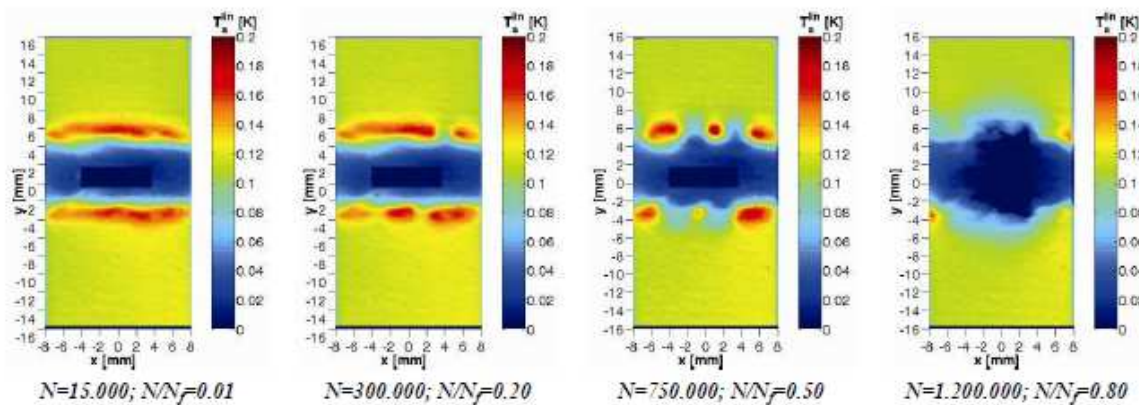
Pokud je třeba vědět jaká je mikrostruktura oceli základního materiálu, svarového kovu, případně potřebujeme znát výslednou mikrostrukturu heterogenního spoje, můžeme použít např. Schäfflerův, De Longův nebo WRC diagram. Z chemického složení materiálu

vypočteme ekvivalent chromu a niklu, kde po vynesení do diagramu získáme strukturní stav.

V dnešní době existují počítačové aplikace, které přesně vypočtou a určí strukturu materiálu nebo výslednou strukturu svarového kovu a tímto usnadní návrh postupu svařování, parametry a následnou tepelnou úpravu svaru.

3.1. Uhlíkové oceli

V experimentální práci [24], která se věnovala detekci únavových trhlin infračervenou termografií, byl připraven vzorek svaru uhlíkové oceli S355J2G3. Speciální infračervenou kamerou a mikroskopem se sledovaly změny ve struktuře svaru při aplikaci cyklického únavového zatížení. V průběhu pokusu byly viditelné koncentrace napětí v tepelně ovlivněné oblasti, které se projevily místním zvýšením teploty. Postupem času vznikaly špičky s místním snížením teploty. Toto je přičítáno vytvořením malých povrchových únavových trhlin. Trhliny rostly v příčném směru svaru i do jeho hloubky. V asi 80% životnosti svaru jsou tyto oblasti s trhlínami přes celou šířku vzorku. Poté se trhliny rozšiřovaly jenom do hloubky svaru.



Obr. 8. Vývoj poškození svarového spoje [24]

Ke vzniku trhlin docházelo poměrně brzy po začátku únavové zkoušky v místech tepelně ovlivněné oblasti. Pro porovnání se testoval také vzorek bez svaru.

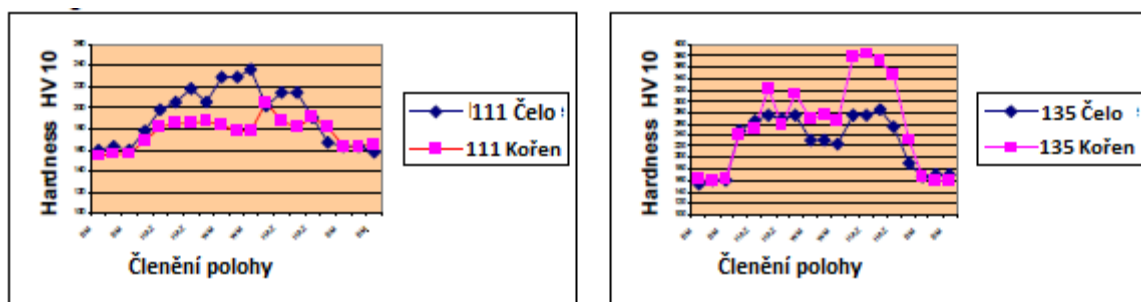
U těchto termografických zkoušek se dá sledovat celý proces degradace svarového spoje. Touto metodou se dají i porovnat výsledky dosažené metodou konečných prvků.

3.2. Nízkolegované oceli

Změnami vlastností nízkolegovaných ocelí v tepelně ovlivněné zóně svaru se zabývá tato práce [25]. Jako základní materiál pro test byl zvolen 16Mo3 ve formě plechu o tloušťce 10mm. Cílem testu bylo ověřit vliv metod svařování 111 a 135 na vlastnosti materiálu, sledování vztahu mezi parametry svařování (proud, napětí, rychlost posunu přídatného materiálu) a získání hodnot tvrdosti a vrubové houževnatosti v tepelně ovlivněné oblasti.

Svarové hrany byly opracovány s úpravou pro V svar. Pro obě metody byly zvoleny jedna kořenová housenka a na ni dvě krycí vrstvy. Teplota předehřevu 130 až 150 °C. Pro metodu 111 byla vybrána elektroda EVB Mo Alkali. U metody 135 byl vybrán drát BOHLER CrMo1Si. U každé metody se prováděly tři svary s různými svařovacími parametry.

Po přípravě vzorků se testovala tvrdost dle Vickerse a mikrotvrdost v tepelně ovlivněné oblasti. Dále se dělalo metalografické vyšetření mikrostruktury základního materiálu, tepelně ovlivněné oblasti a svarového kovu. Prováděl se také test vrubové houževnatosti a test velikosti zrna.



Obr. 9. Diagramy průběhu tvrdosti pro metody 111 a 135
BM – základní materiál, HAZ – tepelně ovlivněná zóna, WM – svarový kov [25]

Z výsledků zkoušek je patrné, že tvrdost v tepelně ovlivněné oblasti je větší při použití metody 135 než při použití metody 111. Mikrostruktura odhaluje přítomnost bainitu a martenzitu ve vzorcích svařených metodou 135. Zatímco při použití metody 111 je přítomen bainit, ferrit a část martenzitu. Hodnoty z testu vrubové houževnatosti získané ze svaru provedeného metodou 111 jsou také větší než u svaru metodou 135.

Vyhovující výsledky u všech zkoušek při všech změnách svařovacích parametrů poskytly jen svarové spoje svařené metodou 111. U svarových spojů svařených metodou 135 byly překročeny maximální dovolené hodnoty tvrdosti. Analýzou výsledků bylo také zjištěno, že snížením parametrů svařování (napětí a proud) u metody 135 vede ke zvýšení nárazové energie. [25]

3.3. Feritické a martenzitické modifikované chromové oceli

V disertační práci [26] věnované vlastnostem těchto materiálů a jejich svarových spojů jsou provedeny zkušební svary materiálu P92 a jejich hodnocení. Svaření třech desek s různými tloušťkami (8, 20 a 40 mm). Pro 8 mm desku byla použita metoda 141. U desky tloušťky 20 mm byl kořen zavařen metodou 141 a zbytek svařování provedeno metodou 111. Deska o tloušťce 40 mm byla svařena metodou 141 v oblasti kořene, další část navařena metodou 111 a zbytek svaru proveden metodou 121.

Všechny metody byly provedeny v poloze PA – vodorovná shora. Pro všechny metody svařování byly vybrány přídatné materiály od firmy Böhler s následující specifikací:

- metoda 141 svařovací drát THERMANIT MTS 616
- metoda 111 elektroda THERMANIT MTS 616
- metoda 141 svařovací drát THERMANIT MTS 616 + tavidlo MARATHON 543

Po svařování bylo aplikováno tepelné zpracování.

Byly realizovány tyto nedestruktivní zkoušky: Vizuální kontrola VT, Kapilární zkouška PT, Radiografická zkouška RT a Ultrazvuková zkouška UT. Jako mechanické zkoušky byly vybrány: Příčná zkouška tahem při +20°C, zkouška rázem v ohybu při +20°C a zkouška tvrdosti. Dále bylo uděláno vyhodnocení makrostruktury a mikrostruktury. Byly také prováděny zkoušky tečení při teplotách 600, 625 a 650 °C. Zkoušky byly prováděny současně na základním materiálu a na svarovém spoji.

Z výsledků vyplývá nutnost použití tepelného zpracování po svaření z důvodu dosažení lepších hodnot vrubové houževnatosti a tvrdosti, jen za mírného poklesu hodnot meze pevnosti. U zkoušek tečení se žárupevnost základního materiálu nachází v dolní povolené oblasti. Taktéž i svarový spoj dosahuje hodnot základního materiálu. Také z toho vyplývá, že podobně jako u dalších chromových ocelí, žárupevnost svarového spoje výrazně klesá z důvodu poškození zpevnění hlavně v interkritické oblasti tepelně

ovlivněné zóny. Dosažené výsledky zkoušek po tepelném zpracování daly přehled o vhodných parametrech tepelného zpracování. [26]

3.4. Austenitické oceli

V experimentálním testu [27] na studium vzniku trhlin za tepla byl svařen základní materiál o tloušťce 60 mm AISI 316L(N)-IG. Jako přídatný materiál vybrán drát THERMANIT 19/15 s průměrem 1,2 mm. Zkušební svar byl proveden kombinací laseru (v kořenové části) a metody 131 jako výplň zbytku svaru. Byly provedeny dva různé typy vzorků podle úprav svarových hran. První sada vzorků má větší úkosy svarových hran a druhá sada přímější. Vzorek byl připevněn na podložku svorkami k minimalizaci změny geometrie základního materiálu z důvodu tepelného pnutí.

Byla provedena vizuální kontrola, radiografická zkouška, makrostruktura a mikrostruktura. Zvlášť pozornost byla věnována vizuální kontrole svaru. Ta ukázala, že trhliny za tepla vznikají převážně u svarů s přímější úpravou svarové hrany. Trhliny vznikaly v první, druhé a třetí svarové housence. Naproti tomu v kořenové části se trhliny nevyskytovaly. V mikrostruktuře svarového kovu bylo zjištěno, že oba svarové kovy mají austenitickou strukturu.

Po výpočtu chromového a niklového ekvivalentu základního a přídatného materiálu a zanesení do Hammar & Swenssonova diagramu je zřejmé, že svarový kov bude mít menší chrom-niklový ekvivalent než základní materiál. Toto také zvyšuje risk vzniku trhlin za tepla. Ke snížení tohoto risku je možné upravit volbu přídatného materiálu. [27]

3.5. Martenzitické chromové oceli

Praktickým ověřením svařitelnosti martenzitické chromové oceli se zabývá tato disertační práce [28]. Pro test byl vybrán základní materiál X20CrMoWV 12 1 1 (Böhler T504). Technologie svařování byla zvolena metoda 111 a elektroda Böhler FOX 20 MVW.

Pro ověření svařitelnosti byly zvoleny dvě různé teploty předehřevu. První teplota předehřevu byla provedena výpočtem na 208 °C (dle L. Beres) – martenzitická metoda svařování a druhá teplota předehřevu dle výrobce oceli na 425 °C – austenitická metoda svařování. Z výsledku měření tvrdosti v tepelně ovlivněné oblasti vyplývá, že úroveň naměřené tvrdosti překračuje dovolenou tvrdost pro tento typ oceli. Proto je po svaření nezbytné aplikovat tepelné zušlechtění dříve, než svar dosáhne na pokojovou teplotu k vyhnutí se risku vzniku studených trhlin ve svarovém spoji.

Výsledky zkoušek tvrdosti také ukazují, že použitá metoda předehřevu a martenzitické techniky svaření je vhodnější pro tento typ oceli a aplikace tepelného zušlechťení po svařování je nutné, aby se vylepšila lomová houževnatost svarového spoje. Také bylo ověřeno, že pokud je teplota předehřevu o 60 °C menší než teplota začátku martenzitické přeměny, vede to k vytvoření 50% martenzitu a 50% austenitu během svařovacího procesu. Tato mikrostruktura redukuje vnitřní napětí ve svařenci a redukuje riziko vzniku trhlin.

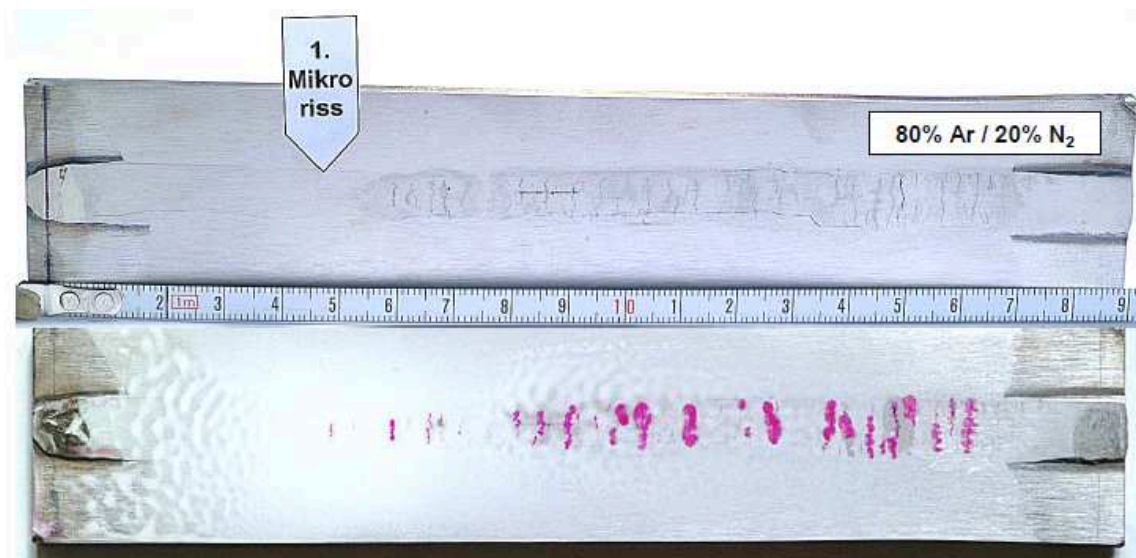
Dále byly provedeny tahová a ohybová zkouška. Výsledky tahové zkoušky potvrzují, že mez pevnosti v tahu zkoušeného vzorku je v rozsahu této meze základního materiálu. U zkoušek v ohybu se objevila slabost svaru v oblasti kořene v porovnání se základním materiálem. Toto bylo nejspíš způsobeno svarovou vadou. Tento test by měl být opakován vícekrát, aby se se dosáhly přesnější výsledky. [28]

3.6. Niklové slitiny

Ve studii [29], která se zabývala vlivem a účinky dusíkatých příměsí v ochranném plynu na vznik trhlin za horka u svarových spojů materiálů na bázi niklu, se prováděly mimo jiné zkoušky materiálu NiCr25FeAlY.

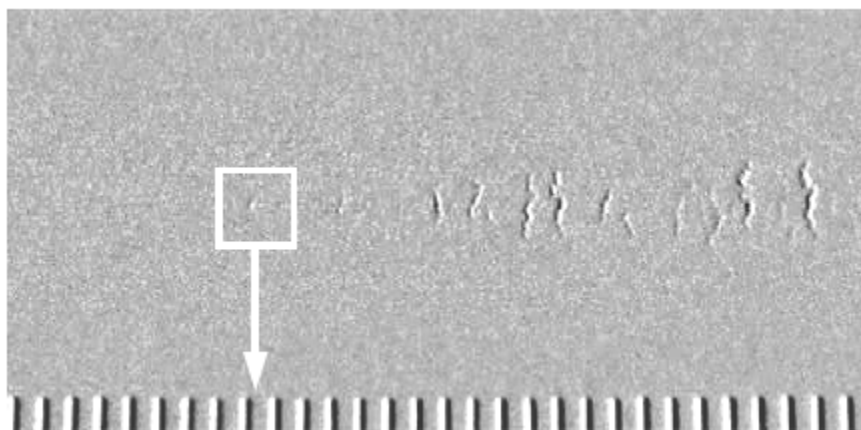
Vzorky byly svařeny metodou 141 a metodou 131 s pulzním svařováním. Svařovací zařízení bylo plně mechanizované. Jako přídatný drát byl určen SG-NiCr25FeAlY. Zkoušela se kombinace různých kvalit inertního plynu a dalších plynů (argon, argon-dusík, argon-dusík-helium, argon-dusík-helium-oxid uhelnatý), aby se našel vztah mezi tvorbou trhlin za horka a obsahem dusíku v inertním plynu. Zkušební vzorky byly svařeny tupým svarem nebo dvojítm koutovým svarem v poloze PA. Jako základní materiál byl použit plech o tloušťce 5 mm a 10 mm, respektive 16 mm. Všechny svary byly testovány metodou PVR, kdy je svařovaný vzorek namáhán tahem během procesu svařování.

Po svaření se aplikovaly nedestruktivní a destruktivní zkoušky, vyhodnocení mikro a makrostruktury, analýza obsahu dusíku ve svarovém kovu. Současně byla kontrolována tvorba trhlin za horka. Měří se vzdálenost od začátku svaru do prvního výskytu trhliny. Poté se vypočítávala kritická rychlost deformace a porovnávala s naměřenou hodnotou. Také byly kontrolovány a měřeny průřezy a geometrie svarů a převýšení svarového kovu v závislosti na typu použitého ochranného plynu u svarů provedených metodou 141.



Obr. 10. Příklad výskytu trhlin za horka ve vzorku při použití kapilární zkoušky [29]

Při svaření metodou 141 byly kapilární zkouškou zkoumány trhliny na zkušební ploše. Poté se trhliny zkoumaly pod mikroskopem. Ze zkoušek je zřejmé, že zvýšení úrovně obsahu dusíku v směsném plynu zvyšuje odolnost proti trhlinám za horka. Výsledky měření rozměrů svaru (šířka a plocha) ukazují na výrazný nárůst při použití argonu a helia ve směsném plynu. Podobný efekt měl i plyn s obsahem argonu, dusíku a helia. Měřil se také obsah dusíku ve svarovém kovu.



Obr. 11. Příklad výskytu trhlin za horka ve vzorku při použití radiografické zkoušky [29]

Také u svaření metodou 131 bylo vidět snížení vzniku trhlin za horka při použití vyšší úrovně dusíku ve směsném plynu s kombinací s oxidem uhelnatým. Byla provedena prohlídka pod mikroskopem a radiografická zkouška. O obou se měřil začátek výskytu vnitřních trhlin o počátku svaru při kombinacích různých směsných plynů. Výsledek zase ukázal na prodloužení začátku výskytu trhlin za horka při použití směsných plynů s obsahem dusíku. [29]

4. Závěr

Předmětem této bakalářské práce bylo přinést přehled materiálů používaných v energetice pro nadkritické parametry, zhodnotit jejich svařitelnost, navrhnout metody svařování a přídatné materiály a na závěr zhodnotit vlastnosti svarových spojů.

Poskytnul jsem přehled materiálů používaných v energetice, které jsem strukturoval do několika skupin podle chemického složení a struktury. Stručně popsal jejich použití a popsal jejich svařitelnost. Dále jsem navrhnul pro každou skupinu tři metody svařování. Pokud bylo možno, tak jsem zvolil přídatný materiál od třech výrobců pro každou zvolenou metodu svařování.

V závěru jsem poskytnul základní přehled zkoušek vlastností svarových spojů a uvedl příklady hodnocení svarových spojů pro všechny druhy materiálů uvedených v této bakalářské práci.

Problémy, které jsem řešil nejvíce, byly s volbou přídatného materiálu. Přídatný materiál se musí co nejvíce přibližovat chemickému složení a pevnosti základnímu materiálu.

K dosažení větší účinnosti tepelných zařízení, elektráren spalujících uhlí a ke snížení emisí je potřeba dosahovat co nejvyšší parametry páry. Proto jsou potřeba vyvíjet a aplikovat nové materiály s adekvátní pevností a odolností proti korozi, vylepšovat technologie svařování a přídatné materiály.

Seznam použité literatury

- [1] **Cieslar, S.** *Nové požadavky na materiály pro energetiku*. Praha : ČSZE, 2005. Sv. 12. 0375-8842.
- [2] **BENDICK, W., von Hagen, I.** *Creep Resistant Ferritic Steels For Power Plants*. [Online] [Citace:12.02 2012.] http://www.cbmm.com.br/portug/sources/techlib/science_techno/table_content/sub_4/images/pdfs/040.pdf.
- [3] **EN10028-2.** *Ploché výrobky z ocelí pro tlakové nádoby a zařízení - Část 2: Nelegované a legované oceli se stanovenými vlastnostmi pro vyšší teploty*. 2010.
- [4] **KOLEKTIV AUTORŮ.** *Materiály a jejich svařitelnost*. Ostrava : ZEROSS, 2001. 292 s. ISBN 80-85771-85-3.
- [5] **EN 10216-2.** *Bezešvé ocelové trubky pro tlakové nádoby a zařízení - Technické dodací podmínky - Část 2: Trubky z nelegovaných a legovaných ocelí se zaručenými vlastnostmi při zvýšených teplotách*. 2008. 48 s.
- [6] **ASTM A335 / A335M - 11.** *Standard Specification for Seamless Ferritic Alloy-Steel Pipe for High-Temperature Service*. 9 s.
- [7] **Salzgitter Mannesmann Stainless Tubes.** *Datasheet DMV 304 HCu*. [Online] [Citace:27.03 2012.] http://www.smt-tubes.com/fileadmin/media/pdf_datasheets/Datasheet_DMV_304_HCu_20081118.pdf.
- [8] **AUSTENITIC STAINLESS STEEL.** *gowelding.com*. [Online] [Citace: 17. 04 2012.] <http://www.gowelding.com/met/austenitic.html>.
- [9] **T-PUT - Böhler Schweisstechnik Deutschland GmbH.** *Welding filler metals for power plant engineering*. [Online] [Citace: 15.02 2012.] http://www.t-put.com/EN_Power_01_2011.pdf.
- [10] **B. HAHN, M. SPIEGEL, W. BENDICK.** *T23, T24 and VM 12 - Structure, Properties, Application*. [Online] [Citace: 29. 03 2012.] Section_IV_Spiegel. http://www.vgb.org/en/event_mqa_pres-orderBy-size.html.
- [11] **THYSSENKRUPP VDM GmbH.** *Material Data Sheet No. 4039, Nicrofer 45 TM*. 1999.

[12] **THYSSENKRUPP VDM GmbH** . *Material Data Sheet No. 4037, Nircofer 6025 HT*. 2007.

[13] **TILLACK, D. J.** *Nickel alloys and stainless steels for elevated temperature service: weldability considerations*. [Online] [Citace: 22. 04 2012.] **NICKEL DEVELOPMENT INSTITUTE**.
[http://www.nickelinstitute.org/~Media/Files/TechnicalLiterature/NickelAlloysandStainlessSteelsforElevatedTemperatureService_WeldabilityConsiderations_14053_.pdf#page=.](http://www.nickelinstitute.org/~Media/Files/TechnicalLiterature/NickelAlloysandStainlessSteelsforElevatedTemperatureService_WeldabilityConsiderations_14053_.pdf#page=)

[14] **KOLEKTIV AUTORŮ.** *Technologie svařování a zařízení*. Ostrava : ZEROSS, 2001. 396 s. ISBN 80-85771-81-0.

[15] **ESAB.** *Katalog přídatných materiálů*. [Online] [Citace: 24. 04 2012.]
http://bcz.vamberk.eu/CD_CZ_5_2011/pages/1_svarovaci.html.

[16] **BÖHLER WELDING.** *Nejpoužívanější přídatné materiály pro svařování*. [Online] [Citace: 24. 04 2012.] http://www.bohler-uddeholm.cz/czech/files/2011_Nejpouzivanejsi_materialy.pdf.

[17] **HYUNDAI WELDING.** *Catalog*. [Online] [Citace: 24. 04 2012.]
http://www.hyundaiwelding.com/eng/product/product_catalog.asp.

[18] **OERLIKON.** *Katalog přídatných materiálů*. [Online] [Citace: 24. 04 2012.]
<http://www.omnitechweld.cz/cze/katalog/katalog.html>.

[19] **Salzgitter Mannesman Stainelss Tubes.** *DMV 304 HCu*. [Online] [Citace: 27. 03 2012.] http://www.smst-tubes.com/fileadmin/media/pdf_datasheets/smst_booklet_304HCu_2008.pdf.

[20] **Schwarz, D.** *Svět svaru*. Ostrava : Hadyna - International s.r.o., 2010. Sv. 1. ISSN 1214-4983.

[21] **SPECIAL METALS.** *Nickel alloy welding product catalogue*. [Online] [Citace: 24. 04 2012.] <http://www.specialmetals.com/documents/WPCprodcat.pdf>.

[22] **UTP.** *Welding consumables*. [Online] [Citace: 24. 04 2012.]
http://www.utp.de/german/files/23UTP_Petrochemical_GB.pdf.

[23] **KRUPP VDM.** *Wire from Krupp VDM*. [Online] [Citace: 24. 04 2012.]
http://www.thyssenkrupp-vdm.com/fileadmin/Downloads/Broschueren/pdf/Draht-Wire_de+en.pdf.

[24] **MEDGENBERG, J. a UMMENHOFER, T.** *Ortsaufgelöste Detektion von Ermüdungsvorgängen in metallischen Werkstoffen mit Infrarot-Thermografie.* [Online] [Citace: 05. 05 2012.] Termografie-Kolloquium 2007 - Vortrag 08. <http://www.ndt.net/article/dgzfp-irt-2007/Inhalt/v08.pdf>.

[25] **FAKIČ, B.; BURIČ, A.; MUMINOVIČ, B.; TOMAŠEVIČ, S.** *Change of physical-metallurgical properties of low-alloy steel 16Mo3 in the heat affected zone in welding processes MMA and MAG.* [Online] [Citace: 01. 05 2012.] <http://www.tmt.unze.ba/zbornik/TMT2011/024-TMT11-303.pdf>.

[26] **HAJDÍK, J.** *Svařitelnost a vlastnosti svarových spojů 9 - 12% Cr modifikovaných žárupevných ocelí.* Ostrava : VŠB - TU Ostrava, 2011. 107 s.

[27] **KARHU, M. a KUJANPÄÄ, V.** *Experimental test set-up for studying hot cracking in multi pass laser hybrid welding of thick section austenitic stainless steel.* [Online] [Citace: 28. 04 2012.] http://www.vtt.fi/files/research/ism/manufacturingsystems/laser_welding_thick_section_austenitic.pdf.

[28] **ELARBI, Y. M.** *Weldability of high Cr and 1 % tungsten alloyed creep resistant martensitic steel.* Budapest : Budapest University of Technology and Economics, 2008.

[29] **HÜBNER, A.** *Untersuchungen über den Einfluss und die Wirkungen von Stickstoffzusätzen im Schutzgas auf das Heißrissverhalten ausgewählter heißrissempfindlicher Nickel-Basiswerkstoffe.* [Online] [Citace: 01. 05 2012.] 204 s. <http://diglib.uni-magdeburg.de/Dissertationen/2005/andhuebner.pdf>.

[30] **DELTASCHOOL OF TRADES.** *Welding Carbon Steel.* [Online] [Citace: 17. 04 2012.] http://deltaschooloftrades.com/welding_carbon_steel.htm.

Seznam použitých obrázků

Obr. 1. Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou 111	20
Obr. 2. Svařování metodou 131/135 (MIG/MAG)	21
Obr. 3. Svařování metodou 141 (WIG)	21
Obr. 4. Svařování elektrickým obloukem pod tavidlem 121	23
Obr. 5. Obloukové svařování plněnou elektrodou bez ochr. plynu 114	27
Obr. 6. Svařování elektronovým paprskem ve vakuu 511	29
Obr. 7. Svařování laserem 52	29
Obr. 8. Vývoj poškození svarového spoje	33
Obr. 9. Diagramy průběhu tvrdosti pro metody 111 a 135	34
Obr. 10. Příklad výskytu trhlin za horka ve vzorku při použití kapilární zkoušky	38
Obr. 11. Příklad výskytu trhlin za horka ve vzorku při použití radiografické zkoušky ..	38